

采用智能控制器的混合型有源电力滤波系统

徐万方, 罗 安, 王丽娜, 涂春鸣

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南省长沙市 410083)

摘要: 介绍了一种基于数字信号处理器(DSP)的智能型混合有源滤波系统, 该系统针对电网电流的不确定性和非线性等特点, 在传统的混合型有源电力滤波系统的基础上, 引入了先进的自适应模糊控制器, 从而最大限度地降低了电网电流的畸变率。通过对有源滤波器投入前后电网波形的比较可以看出, 所提出的智能型混合有源滤波系统大大改善了传统滤波器的滤波效果, 对负载产生的各次谐波均具有良好的滤波性能。

关键词: 滤波器; 谐波补偿; 自适应模糊控制器

中图分类号: TN713.8; TM761

0 引言

在国内的工程实践中, 常采用 LC 或 LCR 无源滤波器组的方法来抑制谐波畸变。但是, 无源滤波器存在一些固有方法上的缺陷, 难以满足目前公共电网对用户谐波畸变水平越来越高的要求。有源滤波技术被公认为是治理电网谐波污染的有力措施, 在国内外掀起了研究热潮。有源滤波技术的基本原理^[1]是首先精确地检测电网谐波电流, 然后控制有源变流器, 产生与其大小相等、方向相反的补偿电流注入电网, 达到削减电网谐波电流的目的。

由于受有源变流器使用的全控型器件功率和频率的限制, 单独使用的有源电力滤波器不能满足工程化应用的要求, 因此出现了有源滤波器和无源滤波器混合使用的各种结构, 既综合两者的优势, 又避免了各自的不足。先进的控制算法的引入, 使得电力系统能够更好地适应非线性比较严重的场合。

本文在硬件上采用数字信号处理器(DSP)作为控制和运算单元, 以提高运算速度, 保证实时性的要求, 同时把自适应模糊控制和有源滤波系统结合起来, 成功地实现了对电网各项参数的自动检测、分析, 并能动态地抑制谐波对电网的损耗, 达到了综合治理谐波的目的。

1 系统的工作原理及主电路结构

图 1 为混合型有源电力滤波系统主电路结构图, 假设有源滤波器是一个理想的受控电压源 u_c , 谐波源被看成一个电流源 i_L 。图 2 为系统滤波主电路的单相等效电路图, Z_s 为电网阻抗, Z_F 为无源

滤波器的阻抗。

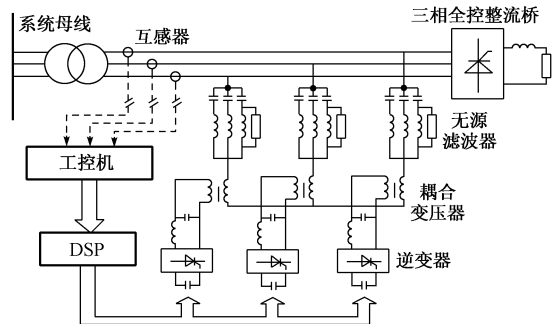


图 1 混合型有源电力滤波系统主电路结构

Fig. 1 Main circuit diagram of the hybrid active power filter system

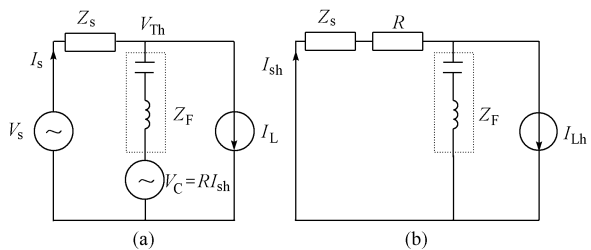


图 2 系统主电路单相等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of the system

控制有源滤波器的输出电压为:

$$V_C = RI_{sh} \quad (1)$$

假设电网电压 V_s 为正弦波, 对谐波源的谐波电流 I_{Lh} 而言, 由图 2(a) 可得出电网电流的谐波分量 I_{sh} 为:

$$I_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + R} I_{Lh} \quad (2)$$

式(2)说明, 对于 I_{sh} 而言, 图 2(a) 和图 2(b) 是等效的, 由图 2(b) 可以看出, 这相当于在电网支路

增加了一个谐波纯电阻 R (对各次谐波而言 R 保持不变)。如果 $R \gg |Z_F|$, 有源滤波器将迫使负载产生的谐波电流几乎全部流入无源滤波器, 提高了无源滤波器的滤波效果。此时有源滤波器的输出补偿电压为所有负载谐波电流流过无源滤波器时产生的电压。对于电网电压中的畸变电压, 有源滤波器将产生与其相同的谐波补偿电压, 以抑制电网中的谐波电流。同时, 有源滤波器还可以起到阻尼系统串、并联谐振的作用。由于有源滤波器不直接对谐波电流进行消除, 而是起到提高无源滤波器滤波效果的目的, 它所产生的补偿电压中不含基波电压, 只有谐波电压, 所以其功率容量小, 适于对大容量的谐波负载进行补偿。

如图 1 所示, 由于目前电力系统中大量的谐波负载是整流桥型负载, 故选取一台带阻容阻感负载的整流桥作为谐波负载。DSP 器件选用 TI 公司的 TMS320F240 处理器, 该芯片采用改进的哈佛结构, 一个指令周期仅有 50 ns, 并具有定时单元、比较单元、PWM 波发生器和快速的中断处理能力, 其数字信号处理能力极强。图 1 中无源滤波器由 2 个单调谐滤波器和二阶高通滤波器组成, 有源滤波器由 3 个单相电压源型 PWM (脉宽调制) 逆变器构成, 通过耦合变压器与无源滤波器串联连接。系统的控制部分由工控机和 DSP 构成, 工控机实现谐波监视、控制的功能, DSP 则起着谐波检测、分析以及控制信号计算的功能。由于有源滤波器的功率容量主要由所有的负载谐波电流流过无源滤波器时产生的谐波电压峰值决定, 通过对无源滤波器进行优化设计可以有效地减小有源滤波器的功率容量, 所以, 混合型有源电力滤波系统的设计首先从无源滤波器的优化设计开始。有源滤波器直流电容器的电压决定滤波系统的谐波电流的跟踪能力, 取值过大则不能将谐波电流完全消除, 过高又会将逆变器和电容器的电压容量增大, 应考虑两方面因素加以综合选取。

本系统中, 无源滤波器的具体参数为: 谐波源的相电压有效值为 98 V, 相电流有效值为 15.2 A; 5 次单调谐滤波器 $L_5 = 16.1$ mH, $C_5 = 25.2$ μ F, $Q_5 = 15$; 7 次单调谐滤波器 $L_7 = 14.2$ mH, $C_7 = 14.5$ μ F, $Q_7 = 14$; 二阶高通滤波器 $L_H = 0.6$ mH, $C_H = 203$ μ F, $R_H = 1.57$ Ω , $m = 1.2$ 。有源滤波器采用 IGBT 作为开关器件, 具体参数如下: 直流侧电容为 450 V, 1 000 μ F; IGBT 参数为 1 200 V, 300 A。逆变器输出侧低通滤波器参数为 $L = 25$ mH, $C = 7$ μ F。耦合变压器变比为 3:1。

2 控制信号的计算

对有源滤波器的控制是通过检测电源电流中的

谐波信号, 然后根据谐波电流误差大小来选取 PWM 逆变器的电压, 控制电网电流中的谐波电流趋于 0 来实现的。对电源电流中的谐波采用了 i_p - i_q 的谐波检测方法^[2], 在电源电压畸变的情况下, 这一方法比 p - q 法更加精确。电网电流由 abc 坐标系变换到 pq 旋转坐标系的变换式为:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) & \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \\ -\cos \omega t & -\cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) & -\cos \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 可以根据线电压由锁相环 (PLL) 电路和正、余弦发生电路得到。

采用低通滤波器可以得到 i_p, i_q 的直流分量 $\bar{i}_p, \bar{i}_q$; 当三相电压对称时, $\bar{i}_p$ 对应于基波的有功电流, $\bar{i}_q$ 对应于基波的无功电流, 由 $\bar{i}_p, \bar{i}_q$ 经反变换可得到三相基波电源电流:

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) & \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \cos \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) & \cos \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

从 i_a, i_b, i_c 中减去 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 可得到谐波电流 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} , 具体的谐波运算采用 DSP 编程实现。由于本系统是三相三线制系统, 只需对两相电流进行运算。

本系统采用三角波调制方法, 如图 3 所示。

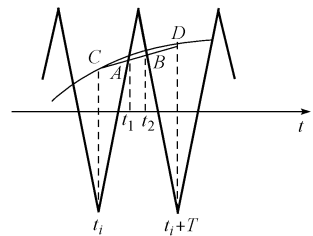


图 3 改进的规则采样法
Fig. 3 Improved regular sample

设三角波的周期为 T , 在相邻 2 个三角波负峰时刻 t_i 和 $t_i + T$ 对调制信号采样得到 C 点和 D 点, 过 C 点和 D 点作一直线与三角波分别交于 A 点和 B 点, 在 A 点的时刻 t_1 和 B 点的时刻 t_2 控制功率开关器件的通断。每个周期的采样时刻 t_i 、三角波的周期 T 和幅值 M 都是确定的, 设调制信号在 C 点和 D 点的值分别为 S_1 和 S_2 , 则线段 CD 的方程为:

$$\frac{t - t_i}{S - S_1} = \frac{T}{S_2 - S_1} \quad (5)$$

三角波两腰的方程分别为:

$$\frac{t - t_i}{S + M} = \frac{T}{4M} \quad (6)$$

$$\frac{t - t_i - T}{S + M} = \frac{-T}{4M} \quad (7)$$

分别联立方程(5)、方程(6)和方程(5)、方程(7)可解得 A 点时刻 t_1 和 B 点时刻 t_2 分别为:

$$t_1 = \frac{T(M + S_1)}{4M + S_1 - S_2} + t_i \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{T(3M - S_1)}{4M + S_2 - S_1} + t_i \quad (9)$$

这样,就得到了 PWM 控制信号的脉宽数据。然后,将三相谐波电流的 PWM 脉宽数送给 DSP 全比较单元,就可得到 PWM 控制信号。

3 智能控制单元

由于对电网的控制是一种不确定性、非线性控制,所以比较适合采用模糊控制器来实现对电流的控制,又由于自适应算法可以对控制参数进行学习和调整,因此采用自适应模糊控制可以取得良好的控制效果。有源电力滤波器的自适应模糊控制原理如图 4 所示。

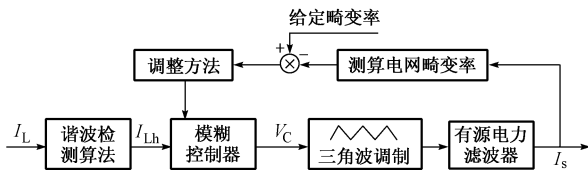


图 4 有源滤波器的自适应模糊控制模块
Fig. 4 Self adaptive fuzzy control module of the active filter

I_{Lh} 为负载的谐波电流, I_s 为电源电流, 负载谐波电流通过模糊控制器转换为三角波调制的调制信号, 然后经过变压器接入电网。我们采用了直接自适应模糊控制方法, 在控制过程中, 通过在线调整模糊控制规则, 实现对模糊控制器的自适应控制, 模糊控制器的控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表
Fig. 1 Fuzzy control rule table

DE	E						
	NB	NH	NS	ZE	PS	PM	YB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

注: $E = I_{LL}$; $DE = E_n - E_{n-1}$ 。

将输入量分为 7 个语言变量, 设 $e(kT - dT)$, $\Delta e(kT - dT)$, $u(kT - dT)$ 表示 d 拍(本系统中取

$d=2$)之前的误差、误差变化及控制量, 为使在 kT 时刻有理想的控制效果, $(k-d)T$ 时刻的控制量为:

$$v(kT - dT) = u(kT - dT) + P(kT) \quad (10)$$

式中: $P(kT)$ 为执行量修正值, 可根据专家经验自适应调整。

这样, 经模糊化后, 得到:

$$R_1(kT) = E(kT - dT) \times \Delta E(kT - dT) \times U(kT - dT) \quad (11)$$

$$R_2(kT) = E(kT - dT) \times \Delta E(kT - dT) \times V(kT - dT) \quad (12)$$

式中: $\times$ 表示两个模糊集合的直积。

设 kT 时刻总的模糊关系为 $R(kT)$, 修正后为 $R(kT + T)$, 则为实现上述修正可使:

$$R(kT + T) = [R(k) \wedge \bar{R}_1(kT)] R_2(kT) \quad (13)$$

根据所测得的误差 $e(kT)$ 、误差变化 $\Delta e(kT)$, 将它们模糊化后与 $R(kT)$ 进行合成运算便可得到模糊控制量 $U(kT)$, 再对 $U(kT)$ 进行清晰化运算便得清晰控制量 $u(kT)$ 。每一采样时刻都按这样的步骤进行计算, 就实现了自适应模糊控制的功能。

输入尺度变换因子 ($K_e, K_{\Delta e}$) 是将实际的输入量变换为模糊集合的论域, K_e 值小将引起较大的稳态误差, K_e 值大则会导致超调量变大。 $K_{\Delta e}$ 小会导致系统响应性能变差, $K_{\Delta e}$ 值大则会导致上升时间增加、稳态误差变大等问题, 所以 K_e 取值大小对系统有重要影响。我们取值时采用了参数自调整方法, 即:

$$\begin{cases} K_e = c_1 |e(kT) - e(\infty)| \\ K_{\Delta e} = \frac{c_2}{|e(kT) - e(\infty)|} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $e(kT)$ 为测得的电网畸变率和给定畸变率之差; $e(\infty)$ 为给定畸变率; c_1, c_2 为调整系数, 可在线调整。

4 系统滤波效果

系统实验结果如图 5 所示(电流显示比例为 10:1), 实验结果使用智能型电网谐波监视、分析、保护一体化装置^[4]检测得到(该装置已通过鉴定并获得湖南省电力公司科技进步二等奖)。图 5(a)给出了滤波器投入前电网中电流的波形, 从图中可看出电网电流发生了严重畸变; 图 5(b)为无源滤波器投入后的电流波形, 波形亦有所改善; 图 5(c)为混合型有源滤波器投入后的电流波形, 波形已非常接近正弦波。从图中还可以看出, 仅投入无源滤波器时, 电网中 5 次、7 次、11 次的谐波畸变量分别为 5%, 4%, 3%, 再将无源滤波器投入, 使整个混合型有源滤波器工作后, 则分别降为 2%, 1%, 0.5%。上述实验结果表明由无源滤波器和有源滤波器串联构成的混合型有源滤波器具有良好的滤波效果。

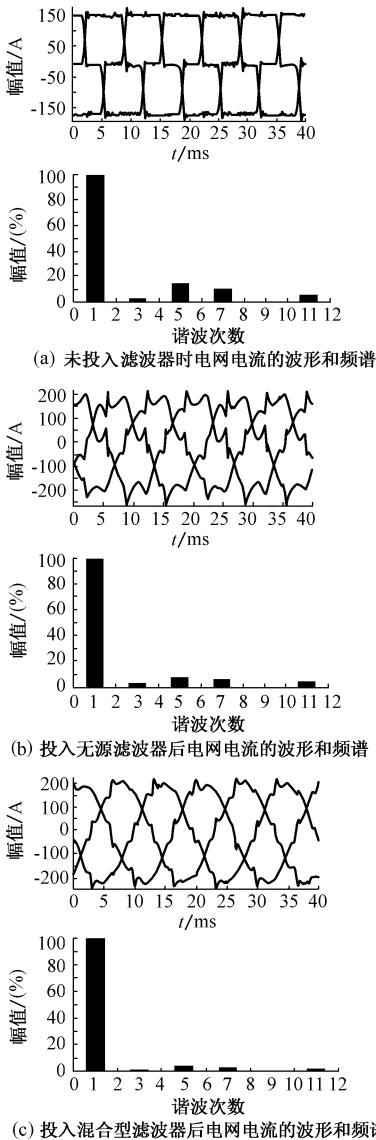


图5 混合型有源电力滤波系统试验结果

Fig. 5 Experiment results of the hybrid active power filter system

5 结语

有源滤波器作为改善供电质量的一项关键技术,在日本、美国、德国等工业发达国家得到了高度

重视和日益广泛的应用^[5]。通过采用自适应控制、模糊控制、智能控制等现代控制理论对有源电力滤波器进行控制,用以提高其稳定性、动态性能及滤波效果,必将成为有源滤波领域一个新的发展趋势。在所研制的系统中,一般情况下按照有关谐波的国家标准,有源电力滤波器的功率容量为被补偿谐波负载的6%,并且在大容量应用场合下(无源滤波器效果比较好)这一比例还可以进一步缩小。实验结果表明,小容量有源电力滤波器的接入可以有效地提高无源滤波器的滤波效果,无论从经济性还是从滤波的性能上都比单独使用无源和有源滤波器具有明显的优势,对于解决当前日益严重的谐波污染问题具有重要的现实意义。

参考文献

- 1 Akagi H. New Trends in Active Filters. In: Proceedings of EPE'95. Sevilla; 1995. 17~26
- 2 王兆安,杨君,刘进军(Wang Zhao'an, Yang Jun, Liu Jinjun). 谐波抑制和无功功率补偿(Harmonic Control and VAR Compensating). 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press),1998
- 3 黄俊,王兆安(Huang Jun, Wang Zhao'an). 电力电子变流技术(Power Electronic Converting Technology). 第3版(3rd ed). 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press),1992
- 4 林干,何志华,李正国,等(Lin Gan, He Zhihua, Li Zhengguo, et al). 智能型电网谐波监视、分析、保护一体化装置(Intelligent Instrument for Integrated Harmonic Detection, Analysis and Protection). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(1)
- 5 胡铭(Hu Ming). 有源滤波技术及应用(Active Filter Technology & Application). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1999,23(3)
- 6 诸静(Zhu Jing). 模糊控制原理及应用(Fuzzy Control Principle & Application). 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press),2001

徐万方(1977—),男,硕士研究生,主要从事电力系统有源滤波、DSP应用的研究与开发方面的研究。E-mail: steven-co@21cn.com

罗安(1957—),男,教授,博士生导师,从事电力自动化技术的研究与开发。

王丽娜(1977—),女,博士研究生,主要从事厂矿企业谐波抑制及无功功率补偿方面的研究。

DEVELOPMENT OF HYBRID ACTIVE POWER FILTER USING INTELLIGENT CONTROLLER

Xu Wanfang, Luo An, Wang Lina, Tu Chunming (Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A novel intelligent hybrid active power filter system based on DSP (digital signal processing) is developed. Because the electrical source current is uncertain and non-linear, an adaptive fuzzy controller is introduced into the traditional active power filter system. This new system can reduce the current deviation of the electrical source to the greatest extent. The experimental results confirm that the system has better filtering effect compared with the traditional active filter and can get perfect filtering performance in many conditions.

This project is supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2002BA218C).

Key words: harmonic compensation; active filters; passive filters; adaptive fuzzy controller